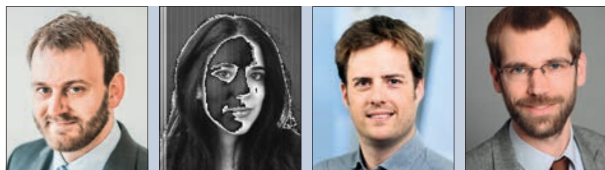
Digitaler Zwilling einer Wärmepumpe für die prognose-basierte Betriebsführung



Autoren

(v.l.:) Reinhard Jentsch, Judit Aizpuru, Michael Lauermann, Tilman Barz, *AIT Austrian Institute of Technology, Center for Energy, Wien, Österreich*

Digitaler Zwilling · adaptive Modellkalibrierung · Leistungsprüfung

Bei der Prüfung nach EN-14511 und EN-14825 werden Leistungskennzahlen von Wärmepumpen unter verschiedenen Teillast- und klimatischen Bedingungen erhoben. Die Effizienz des Prüfablaufs ist dabei stark abhängig von den Einstellungen des Bedienpersonals und dessen Erfahrung bei der Einschätzung von Wechselwirkungen zwischen der Wärmepumpe als Black-Box-System und der Prüfinfrastruktur. Im Beitrag wird gezeigt, wie ein digitaler Zwilling der Wärmepumpe für die prognosebasierte Betriebsführung der Leistungsprüfung eingesetzt werden kann. Dazu wird ein Modelica-Modell einer Wärmepumpe als Functional Mockup Unit (FMU) mit den Realdaten der Prüfung zu einem digitalen Zwilling verknüpft. Mit jedem neuen Satz an Messwerten werden die Modellparameter adaptiv identifiziert und das Modell kalibriert. Der digitale Zwilling liefert dem Bediener Vorschläge zu optimalen Einstellungen, die bisher nur aufwändig und iterativ während des Prüfbetriebs abgeleitet werden konnten. Das Vorschlagssystem wurde in der AIT-Testinfrastruktur implementiert und erstmalig eingesetzt. Es liefert verlässliche Vorschläge. Als ein Ergebnis der Prüfung resultiert ein kalibriertes Wärmepumpenmodell.



Digital twin of a heat pump for forecast-enhanced operation

Digital twin · adaptive model calibration · performance testing

According to EN-14511 and EN-14825 heat pump performance is determined by measurement of the energy consumption for various part-load and climatic conditions in an accredited test laboratory. Depending on the experience of the operator the time and resource efficiency of the test procedure might vary considerably. This contribution proposes a digital twin and predictive modeling to provide operators with decision support towards an optimized and reproducible lab operation. The digital twin links standard operating procedures, real-world data and a Functional-Mock-up-Unit (FMU) of a thermodynamic heat pump model. During the test procedure, with each set of new measurements model parameters are adaptively calibrated, improved operating conditions are computed and improved settings are prosed to the operator. The decision support system was implemented at AIT's test infrastructure and positively evaluated. It provides reliable forecasts and effectively enhances lab operations.



Einleitung

Digitalisierung und Industrie 4.0, Industrial Internet of Things (IIoT) und Cyber Physical Production Systems bedeuten grundlegende Veränderungen, die vor allem kleine und mittlere Betriebe vor große Herausforderungen stellen. Die erfolgreiche Transformation eines Produktionsbetriebs erfordert einen vergleichsweisen hohen Einsatz von Ressourcen. Demgegenüber stehen teilweise unklare Ziele bzw. ist der erwartbare Nutzen schwer quantifizierbar [1]. Die Entwicklung von methodischen Ansätzen und Werkzeugen zur Digitalisierung sowie deren erfolgreiche Demonstration am Fallbeispiel sollen helfen, Herausforderungen zu erkennen, Lösungsansätze bereitzustellen und Potenziale zu identifizieren und zu bewerten. Eine Schlüsselrolle nimmt der sogenannte digitale Zwilling ein, der ursprünglich von Grieves und Vickers [2] im Kontext des product life cycle management verwendet wurde. Wesentliche Elemente sind ein reales Objekt in einer realen Umgebung, ein virtuelles Objekt in virtueller Umgebung und eine Datenverbindung zwischen diesen. Der Begriff des digitalen Zwillings wurde in weiterer Folge zur Beschreibung ultragenauer virtueller Abbildungen von Raumfahrzeugen verwendet, welche die gesamte Lebenshistorie betrachten [3, 4]. Mit der Verbreitung von IoT-Technologie und der verbesserten Verfügbarkeit von Speicher- und Rechenleistung wurde das Konzept in den unterschiedlichsten Domänen aufgegriffen. Allgemein finden sich digitale Zwillinge sowohl auf einer operativen als auch einer organisatorischen Ebene, siehe Abb. 1, und sind meist Weiterentwicklungen bzw. Synthesen etablierter Methoden und Werkzeuge der Informationstechnik, im Operational-Technology-Bereich (Prozesssteuerung, Automatisierung) sowie bei den Betriebswissenschaften. Die grundlegende Idee ist dabei, eine möglichst enge und vollständige Kopplung von realem Objekt mit seinen Daten und Modellen sowie der wiederholte zyklische Abgleich (Twinning-Zyklus). Auf organisatorischer Ebene bedeutet das, dass die Informationen eines Objektes kontinuierlich über den gesamten Lebenszyklus gesammelt, verwaltet und verwertet werden können. Anstelle von

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.com



KI Kälte · Luft · Klimatechnik

INGENIEURWISSEN IN FORSCHUNG UND PRAXIS



Entdecken Sie weitere interessante Artikel und News zum Thema auf ki-portal.de!

Hier klicken & informieren!

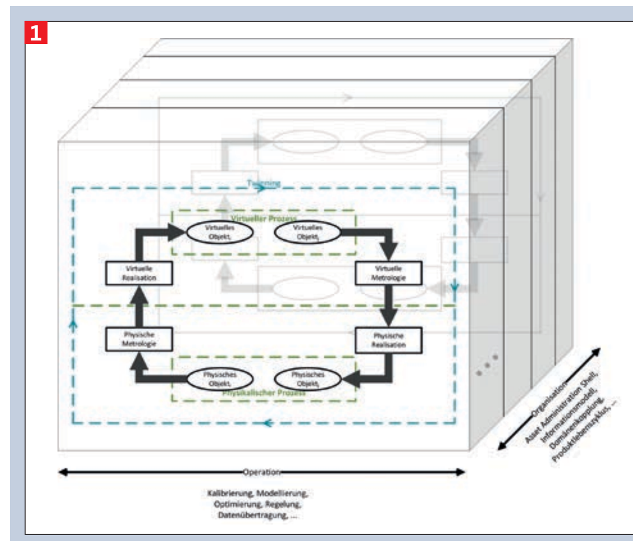


Dokumenten werden Daten und Modelle des digitalen Zwillings über den Lebenszyklus zwischen Stakeholdern ausgetauscht [5, 6]. Detaillierte Statusinformationen eines Objekts werden permanent und in Echtzeit verfügbar, und ermöglichen beispielsweise nutzungsbasierte Anwendungen und Geschäftsmodelle. Operativ ermöglicht der Abgleich und die wiederholte Anpassung des DZ bspw. die Optimierung des Betriebs und Produktentwicklung sowie die Flexibilisierung von Produktionsprozessen. So kann zum Beispiel ein DZ in Form eines physikalischen oder datengetriebenen Modells fehlerhafte Bauteile einer Wärmepumpe identifizieren, die im Weiteren in einem 3D-Modell visualisiert werden.

Der vorliegende Beitrag zeigt die Entwicklung und Implementierung eines Assistenzsystems zur Prozessführung in der AIT-Prüfinfrastruktur für Kompressionswärmepumpen. Das System basiert auf einem digitalen Zwilling in Form eines physikalischen Wärmepumpenmodells des Prüflings. Bei den Tests werden Leistungsdaten nach EN-14511 und EN-14825 für kommerzielle Wärmepumpen erhoben. Aufgrund der Breite an getesteten Leistungskapazitäten, der Notwendigkeit individueller Einstellungen an der Wärmepumpe und unterschiedlicher Testprotokolle, kann der Prüfablauf nicht bzw. nur sehr schwer vollständig automatisiert werden und erfordert zahlreiche Interaktionen vom Operator. Der Beitrag präsentiert die vollständige Instanziierung des DZ in Analogie zu [7]

1 Parameter eines Prüfpunkts

Symbol	Bedeutung
P^V	El. Leistungsaufnahme des Verdichters
n^V	Verdichterdrehzahl
$T^o_{ein\,/aus}$	Eintritts-/Austrittstemperaturen des Verdampfers
$T^c_{ein\,/aus}$	Eintritts-/Austrittstemperaturen des Kondensators
$\dot{m}^o$	Quellen-Massenstrom Verdampfer
$\dot{m}^c$	Senken-Massenstrom Verflüssiger
$\dot{Q}^o$	Wärmestrom Verdampfer
$\dot{Q}^c$	Wärmestrom Verflüssiger
r	Teillastverhältnis



Der digitale Zwilling umfasst sowohl die Anwendung bzw. Instanziierung von Twinning-Zyklen als auch die Verknüpfung von Modellen und Daten über Domänen und Lebenszyklusphasen.

und damit eine operative Anwendung eines Twinning-Zyklus von der „Planung bis zum Prüfbericht". Der DZ wird am Prüfstand gemäß den realen Messdaten angepasst und für eine optimierte Betriebsführung eingesetzt. Diese Instanz des DZ (ein kalibriertes thermodynamisches Modell) könnte beispielsweise im weiteren Lebenszyklus der Wärmepumpe in Gebäudesimulation für Design und Betrieb eingesetzt werden.

1.1 Wärmepumpentests und Teillastbedingungen

WP-Prüfungen werden von einem akkreditierten Prüfinstitut nach EN-14511 und EN-14825 für einen vordefinierten Satz spezifischer stationärer Betriebspunkte durchgeführt. Die Stationarität eines Prüfpunkts wird anhand von Temperaturen und Massenströmen überprüft. Die WP-Leistungsdaten werden basierend auf den Messergebnissen und Einstellungen errechnet und in das Prüfprotokoll übernommen. Für die in diesem Beitrag betrachtete Leistungsprüfung ist ein Prüfpunkt durch folgende Größen definiert (Tab. 1).

Die Einstellung eines Prüfpunkts kann unter Umständen sehr zeitaufwändig sein, üblicherweise im Bereich von mehreren Stunden. Grund dafür ist zum einen die thermische und stoffliche Kopplung von Wärmepumpe und Prüfinfrastruktur, die zu längeren Einschwingphasen führt, bis die Anforderungen an die Stationarität und absolute und relative Toleranzen der Abweichungen erfüllt sind. Zudem gibt es infrastrukturspezifisch, für den gezeigten Fall, relativ im Vergleich zur Kapazität der Wärmepumpe, große thermische Massen der Pufferspeicher auf der Wärmenutzer- und Wärmequellenanlage.

Zusätzlich erhöht sich der experimentelle Aufwand signifikant, wenn für WP mit bestimmten Kompressortypen Teillastpunkte nicht direkt eingestellt werden können. Der Grund dafür sind Kompressoren mit fixer Drehzahl oder Teillastpunkte unterhalb einer minimalen Kompressordrehzahl. In diesem Fall müssen die Testbedingungen an einen fiktiven Ein-/Ausbetrieb angepasst werden. Nach EN-14825 ist ein iteratives Verfahren vorgesehen, um die gesuchte Senkenaustrittstemperatur in Abhängigkeit der unbekannten Wärmepumpenkapazität und der Senkeneintrittstemperatur zu bestimmen. Die Einstellung dieser iterativen Testpunkte, die für das Prüfprotokoll nicht relevant sind, macht diese Teillastpunkte besonders zeitaufwändig.

Nach EN-14825 wird für jeden Testpunkt die durchschnittliche Senkentemperatur aus den gemessenen Temperaturen und der entsprechenden WP-Kapazität gemäß Gleichung 1 berechnet.

$$T^c_{avg} = T^c_{ein} + (T^c_{aus} - T^c_{ein}) \cdot CR \qquad \text{(Gl. 1)}$$

Wobei das Kapazitätsverhältnis CR wie folgt definiert ist:

$$CR = r \cdot \frac{\dot{Q}^c_{ref}}{\dot{Q}^c} \qquad \text{(Gl. 2)}$$

Dabei ist r ∈ (0,1] das durch die Norm für jeden Prüfpunkt vorgegebene Teillastverhältnis. Dies entspricht dem Quotienten aus der gemessenen Heizleistung im Referenzpunkt und der Wärmekapazität bei aktueller Teillast und Temperatur. Iterativ findet sich die gesuchte Austritts-

2 Variablen der Iteration

Symbol	Bedeutung
T_{avg}^{c}	Berechnete durchschnittliche Austrittstemperatur am Kondensator
CR	Kapazitätsverhältnis
$\dot{Q}_{ref}^{c}$	Heizleistung im Referenzpunkt
$T_{aus}^{c,norm}$	Kondensatoraustrittstemperatur laut Norm
$\Delta T_{avg}^{c,i}$	Korrekturfaktor der Kondensatoraustrittstemperatur

temperatur gemäß Gleichungen 3 und 4:

$$T_{aus}^{c,i+1} = T_{aus}^{c,i} + \Delta T_{avg}^{c,i} \qquad \text{(Gl. 3)}$$

$$\Delta T_{avg}^{c,i} = T_{aus}^{c,norm} - T_{avg}^{c,i} \qquad \text{(Gl. 4)}$$

Das hochgestellte i repräsentiert die gemessenen bzw. anhand von Messdaten ermittelten Informationen der i-ten Iteration, während i+1 den daraus abgeleiteten Setzwert des folgenden Testpunktes präsentiert. Die Variablen sind in Tab. 2 definiert.

Die Iteration ist abgeschlossen, wenn der berechnete Korrekturfaktor $\Delta T_{avg}^{c,i}$ kleiner ist als die erlaubte Messtoleranz nach EN-14511. Zusätzlich ergibt sich, je nach Prüfungsmodus, die Kondensator-Eintrittstemperatur gemäß einer konstanten Temperaturdifferenz oder einem konstanten Massenstrom. Dabei ist entweder der Massenstrom oder die Eintrittstemperatur wiederum abhängig von der zuvor unbekannten WP-Heizleistung bei $T_{aus}^{c,i+1}$.

1.2 Assistenzsystem basierend auf einem digitalen Zwilling der Wärmepumpe

Ziel ist es, die zeitaufwändige experimentelle Einstellung und Evaluierung von Testpunkten (nicht Prüfpunkten), die nur der iterativen Suche nach den korrekten Prüfbedingungen dienen, zu vermeiden. Die wiederholte experimentelle Einstellung von Testpunkten, entsprechend Iterationen in Gleichungen 1–4, wird durch Simulationen ersetzt. Die Zustände und die optimalen Temperaturen und Massenstrom-Setzwerte des Prüfpunktes werden virtuell ermittelt. Im Folgenden wird der Einsatz des Assistenzsystems für den Prüfbetrieb mit konstanter Temperaturdifferenz demonstriert, siehe EN-14825.

2 Aufbau des digitalen Zwillings

2.1 Physische Umgebung

Mit der physischen Umgebung wird jene in der realen Welt existierende Umgebung erfasst, in der das physische Objekt existiert. Sie umfasst alle Aspekte die einen Einfluss auf den physikalischen Prozess haben, im vorliegenden Fall die gesamte Laborinfrastruktur und den Anlagenfahrer.

Die Laborinfrastruktur umfasst eine Klimakammer, in der die WP angeschlossen wird und eine Wärmenutzer- und eine Wärmequellenanlage sowie eine übergeordnete Kälte- und Wärmebereitstellung. Ebenso Teil der physischen Umgebung ist die dazugehörige Mess-, Steuer- und Regelungstechnik. Sie besteht aus einer Messkette für die akkreditierte Messwerterfassung im Sinne der EN und einem SCADA-System für die Prüfinfrastruktur und Peripherie. Beide Systeme sind über OPC-UA mit einer übergeordneten Rezeptsteuerung verbunden.

Physischer Prozess

Der physische Prozess verändert den Zustand und damit die Parameter des physischen Objekts, der Wärmepumpe. In diesem Beispiel ist das die Leistungsprüfung nach EN-14511 und EN-14825. Jeder Prüfpunkt ist definiert durch die Parameter in Tab. 1.

Einfluss auf das physische Objekt wird durch Setzen der Eintrittstemperaturen, durch den Anlagenfahrer im SCADA-System an Verdampfer oder Kondensator und durch Einstellen der Massenströme über Ventilstellungen und Umwälzpumpendrehzahl genommen.

Physische Metrologie

Aufgabe der physischen Metrologie ist die Erfassung der für den Twinning-Zyklus relevanten Größen bzw. die Erfassung des Zustands des physischen Objekts, siehe die Zustandsgrößen in Tab. 1. Die Drehzahl n_V und das Teillastverhältnis r sind durch den Hersteller bzw. die Norm vorgegeben und werden vom Anlagenfahrer erfasst. Alle weiteren Größen werden über eine kalibrierte Messsensorik erfasst über OPC-UA an die zentrale Rezeptsteuerung bereitgestellt.

Physische Realisierung

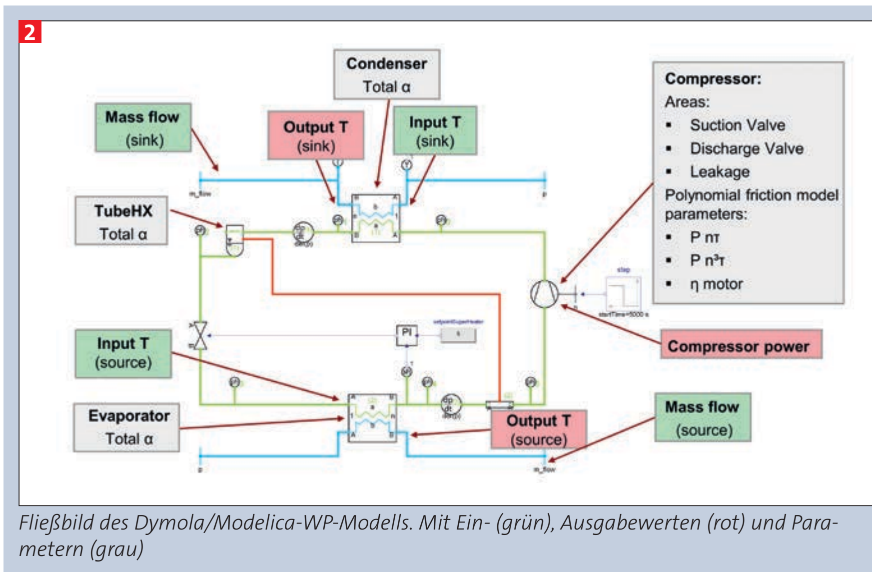
Aufgabe der physischen Realisierung ist der Abgleich bzw. die Übertragung des Zustands des virtuellen Objekts auf das physische Objekt. Im vorliegenden Anwendungsfall erfolgt dies durch den Anlagenfahrer. Er übernimmt die Vorschlagswerte, Eintrittstemperatur und Massenstrom der Wärmenutzeranlage aus dem Assistenzsystem in die Rezeptsteuerung. In weiterer Folge werden diese über OPC-UA an das SCADA-System übergeben.

2.2 Virtuelle Umgebung

In Analogie zur physischen Umgebung ist die virtuelle Umgebung jene, die das virtuelle Objekt bzw. Aggregat von virtuellen Objekten und den virtuellen Pro-

3 Komponenten des digitalen Zwillings nach [7]

Bezeichnung	Entsprechung
Physisches Objekt	Wärmepumpe
Virtuelles Objekt	FMU und Parametersatz
Physischer Prozess	Leistungsprüfung nach EN-14528 und EN-14511
Virtueller Prozess	Simulation der Wärmepumpen-FMU
Physische Umgebung	Wärmepumpen-Prüfstand und Anlagenfahrer
Virtuelle Umgebung	SQL-Datenbank, Rezeptsteuerung und Python
Twinning-Rate	Mit jedem stabilen Prüfpunkt
Parameter	Temperaturen, Massenströme und Leistungsdaten
Zustand	Aktueller, historischer oder vorhergesagter stationärer Prüfpunkt
Physisch-zu-virtuell-Verbindung	Umfasst physische Metrologie und virtuelle Realisierung
Physische Metrologie	Erfassung und Übertragung von Messwerten
Virtuelle Realisierung	Modellkalibration und Parameterschätzung
Virtuell-zu-Real-Verbindung	Umfasst virtuelle Metrologie und physische Realisierung
Virtuelle Metrologie	Berechnung der Vorschlagswerte aus Simulationsdaten
Physische Realisierung	Übernahme der Vorschlagswerte durch den Anlagenfahrer



Fließbild des Dymola/Modelica-WP-Modells. Mit Ein- (grün), Ausgabewerten (rot) und Parametern (grau)

zess umfasst. Sie ist Teil der rein digitalen Domäne. Die für die physische Realisierung notwendigen Daten des Twinning-Zyklus werden hier generiert.

Im vorliegenden Fall umfasst sie die SQL-Datenbank der Rezeptsteuerung, die alle Versuchsdaten beinhaltet sowie Python-Code und eine Functional Mock-up-Unit (FMU).

Virtuelles Objekt

Das virtuelle Objekt ist eine digitale Abbildung des physischen Objekts und seines Zustands. In diesem Beispiel ist das virtuelle Objekt eine FMU eines numerischen physikalischen Modelica-Modells der Wärmepumpe und eines dazugehörenden Variablen- und Parametersatzes, die gemeinsam als Python-Objekt instanziiert werden. Abb. 1 zeigt das Dymola/Modelica-WP-Modell mit Eingabe- (grün) und Ausgabewerten (rot), die für jeden Prüfpunkt definiert sind. Die Eingangswerte entsprechen den Setzwerten an der Laborinfrastruktur während der Prüfung. Weiters sind in grau jene Modellparameter dargestellt, die nicht a priori bekannt sind und somit erst über eine Modellkalibrierung mit Messwerten ermittelt werden müssen.

Virtuelle Realisierung

Bei der virtuellen Realisierung wird das virtuelle Objekt mit dem Zustand des realen Objektes abgeglichen. Konkret bedeutet das die Ermittlung eines Parametersatzes, der die Ein- und Ausgabegrößen der FMU bestmöglich mit den Messwerten abgleicht. Das Wärmepumpenmodell entspricht einem nichtlinearen Gleichungssystem, das basierend auf einem Vektor mit Eingangsgrößen u und einem Satz an konstanten Modellparametern $\boldsymbol{\theta}$ die Zustandsgrößen $\boldsymbol{y}$ vorhersagt:

$$\boldsymbol{y} = f(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{\theta}) \qquad \text{(Gl. 5)}$$

Der Parametervektor $\boldsymbol{\theta}$ enthält sowohl bekannte als auch unbekannte Parameter. Letztere sind vom Hersteller nicht verfügbar und daher indirekt aus den experimentellen Messungen zu bestimmen (schätzen). Die Parameterschätzung (model fitting) passt das Modell an gemessene Ausgangsgrößen $\boldsymbol{y}_m$ durch die numerische Lösung eines Minimierungsproblems an. Als Zielkriterium wird hier die Summe der nicht gewichteten kleinsten Quadrate der Abweichungen zwischen gemessenen und vom Modell vorhergesagten Zuständen eingesetzt:

$$\widehat{\boldsymbol{\theta}} = \arg\min_{\theta} \Phi(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{\theta}) \qquad \text{(Gl. 6)}$$

$$\Phi(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^{n_m} (\boldsymbol{y}^i - \boldsymbol{y}_m^i)^2 \qquad \text{(Gl. 7)}$$

Mögliche Probleme entstehen, wenn die Komplexität des Systems im Vergleich zum Informationsgehalt in den verfügbaren Messdaten zu groß ist – in diesem Fall ist das Parameterschätzproblem in Gleichung 6 mathematisch schlecht gestellt (ill-posed). Mögliche Gründe sind: Die Parameter, die geschätzt werden müssen, haben keinen signifikanten Einfluss auf die Zustände, welche den Messgrößen entsprechen; die zu identifizierenden Parameter sind kollinear, Änderungen der Größe eines Parameters können durch Änderungen in anderen Parametern kompensiert werden; oder die Datenmenge (Anzahl an Mess-Datenpunkten) reicht einfach nicht aus.

Modelle, die unter diesen Umständen angepasst werden, sind sogenannte überangepasste Modelle (overfitted models) mit geringer Vorhersagekraft und großen Unsicherheiten in den geschätzten Parameterwerten. Beim Einsatz von (Stand der Technik) effizienten gradientenbasierten Methoden zur Lösung des Parameterschätzproblems sind darüber hinaus numerische Instabilitäten und Konvergenzprobleme zu erwarten.

Um den oben genannten Herausforderungen zu begegnen, wurde im Rahmen des Beitrags die in [8] vorgeschlagene Methodik eingesetzt. Die Methode basiert auf der Identifikation einer Teilmenge an Parametern aus dem unbekannten (zu schätzenden) Parameterraum, die zuverlässig geschätzt werden kann. Diese Teilmenge entspricht den identifizierbaren Parametern. Das Problem in Gleichung 6 wird entsprechend um die nicht identifizierbaren Parameter reduziert. Die Methodik basiert auf der Singulärwertzerlegung der Sensitivitätsmatrix $\boldsymbol{S}$ und liefert die gleichen Informationen wie die Analyse des Eigensystems der Hesse-Matrix, die üblicherweise zur Untersuchung der Stabilität des Parameterschätzproblems verwendet wird. Die Sensitivitätsmatrix $\boldsymbol{S}$ beschreibt, wie empfindlich Zustände im Vektor $\boldsymbol{y}$ auf kleine Änderungen in den Parametern in Vektor $\boldsymbol{\theta}$ reagieren:

$$S_{ij} = \left.\frac{\partial y_i}{\partial \theta_j}\right|_{\boldsymbol{\theta}_0} \qquad \text{(Gl. 8)}$$

Dabei ist y_i der i-te Ausgang der Funktion, θ_j der j-te Parameter und $\boldsymbol{\theta}_0$ der Punkt, um den herum Störungen (kleine Änderungen) realisiert werden. Die Dimension der Sensitivitätsmatrix $\boldsymbol{S}$ ist $n_m \times n_p$, wobei n_m die Anzahl der Messungen ist und n_p die Anzahl der Parameter. Die Sensitivitätsanalyse ist eine lokale Analyse, ihre Ergebnisse müssen entsprechend aktualisiert werden, sobald neue (bessere) Parameterschätzungen verfügbar sind.

Der Rang r($\boldsymbol{S}$) bestimmt die Anzahl der linear unabhängigen Modellparameter, d. h. die Parameter, welche die identifizierbare Teilmenge des ursprünglichen n_p Parameterraums bilden. Die Auswahl der identifizierbaren Parameter erfolgt durch die Ordnung der Spalten von $\boldsymbol{S}$ in abnehmender Reihenfolge der linearen Unabhängigkeit (über QR-Zerlegung mit Spaltenpivotisierung). Jede Spalte ent-

spricht genau einem Parameter. Entsprechend werden die ersten r($\boldsymbol{S}$)-Spalten (Parameter) als identifizierbar ausgewählt. Die Funktion, welche die Auswahl der Parameterteilmenge beschreibt, kann wie folgt ausgedrückt werden:

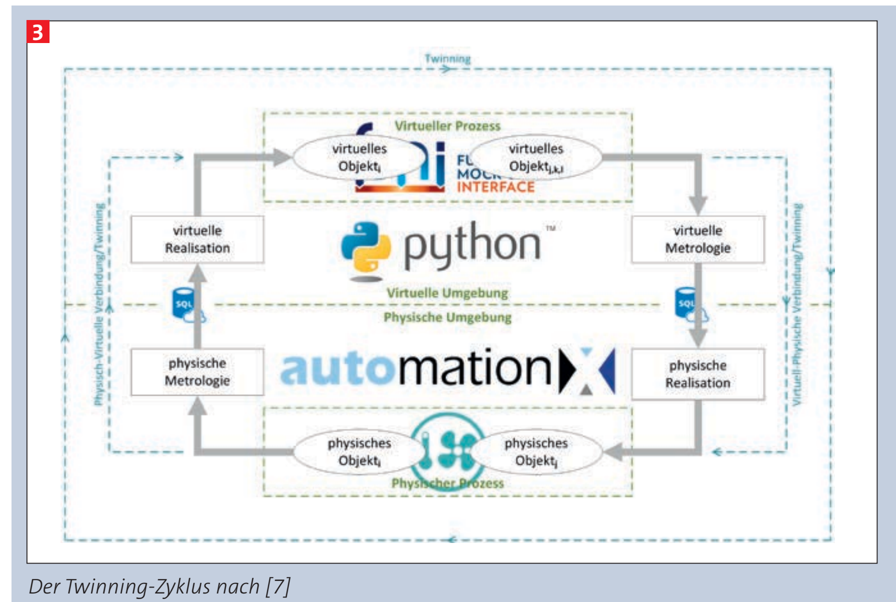
$$\boldsymbol{\Theta} \in \mathbb{R}^{n_p} \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{\theta}_{idSS} \in \mathbb{R}^{r(S)} \qquad \text{(Gl. 9)}$$

Die Performanz des modellbasierten „Assistenzsystems“ (siehe Abschnitt 2.3) hängt entscheidend von der Genauigkeit des WP-Modells und damit von der Genauigkeit der zu schätzenden Parameterwerte ab. Um den Informationsgehalt in den verfügbaren Messdaten möglichst frühzeitig für die Parameterschätzung zu nutzen, wird diese wiederholt durchgeführt: Immer dann, wenn neue Messdaten eines Prüfpunkts verfügbar sind, wird die identifizierbare Parametermenge ermittelt und diese Parameter werden (neu) geschätzt. Die Werte der letzten Parameterschätzung werden für die Initialisierung der Parameterwerte der folgenden Schätzung genutzt. Mit zunehmender Anzahl der Prüfpunkte erhöht sich die Anzahl (n_m) der verfügbaren Messwerte und damit die Dimension ($n_m \times n_p$) der Sensitivitätsmatrix $\boldsymbol{S}$. Aufgrund des wachsenden Informationsgehaltes in den Messdaten nimmt auch die Anzahl der identifizierbaren Parameter im Laufe des Experiments zu.

Virtuelle Metrologie

Aufgabe der virtuellen Metrologie ist es, jene Werte zu erfassen, die in der physischen Realisierung im Twinning-Zyklus am Objekt umgesetzt werden. Sie ist damit abhängig von der konkreten Anwendung des digitalen Zwillings. Basierend auf einem Algorithmus werden aus dem Aggregat bzw. Zustandsraum virtueller Objekte jene ausgewählt, die der gewünschten Anwendung bzw. dem wahrgenommenen Nutzen des digitalen Zwillings entsprechen. Im konkreten Fall ist das die Ermittlung von Vorschlagswerten für ein Assistenzsystem auf Basis von Simulationsdaten der FMU.

Das sogenannte Assistenzsystem ist eine Funktion, deren Eingangsgrößen die Bedingungen des Prüfpunkts sind: die Kondensatoraustrittstemperatur entsprechend Norm T^c_{norm}, die Temperaturdifferenz am Kondensator ΔT^c_{norm}, das Teillastverhältnis r und die Referenzheizleistung $\dot{Q}^c_{\text{ref}}$. Rückgabewerte sind die Eintrittstemperatur und der Massenstrom, der am Kondensator eingestellt werden soll, siehe Gleichung 10:



Der Twinning-Zyklus nach [7]

$$\mathrm{R} = \left(T^c_{\text{ein}}, \dot{m}^c\right) = \mathrm{f}\left(T^c_{\text{norm}}, \Delta T^c_{\text{norm}}, r, \dot{Q}^c_{\text{ref}}\right) \qquad \text{(Gl. 10)}$$

Der empfohlene Massenstrom $\dot{m}^c$ wird mittels numerischem Lösungsverfahren iterativ für die gegebene Temperaturdifferenz und in Abhängigkeit der Kondensatortemperaturen ermittelt. Die Kondensatoraustrittstemperatur T^c_{aus} wird gemäß der in Gleichungen 1–4 beschriebenen Verfahren ermittelt. Dabei wird jeweils der virtuelle Prozess, d. h. die Simulation der FMU mehrfach angestoßen, um die entsprechenden Ein- und Ausgangsgrößen des Modells und damit den auf das reale Objekt zu übertragenden Zustand zu ermitteln.

2.3 Twinning-Zyklus – Adaptive Parameteranpassung und Assistenzsystem

Unter Twinning versteht man den (periodischen) Abgleich zwischen realer und virtueller Welt. Er erfolgt bidirektional über die Physisch-zu-virtuell-Verbindung und die Virtuell-zu-physisch-Verbindung. Die Frequenz des Abgleichs (Twinning-Rate) erfolgt je nach Anwendungsbedarf, d. h. dem Nutzen, der aus dem digitalen Zwilling entstehen soll.

Im gezeigten Beispiel ist das zunächst die Erfassung der Parameter eines stationären Prüfpunkts der Wärmepumpe (dem physischen Objekt), bezeichnet als Zustand i. Die Übertragung auf das virtuelle Objekt der FMU des Wärmepumpenmodells erfolgt durch Anpassung des Modell-Parametersatzes an die Messwerte nach den in Abschnitt „Virtuelles Objekt“ beschriebenen Methoden. Anschließend erfolgt die iterative Ermittlung neuer Parameter mithilfe des FMU-Simulationsmodells nach der in Abschnitt „Virtuelle Metrologie“ beschriebenen Methodik. Zuletzt wird dieser neu ermittelte Zustand j auf die Wärmpumpe übertragen, indem er über das Assistenzsystem dem Anlagenfahrer zur Verfügung gestellt und in die Steuerung übernommen werden kann (physische Realisierung). Dieser Zyklus ist in Abb. 3 dargestellt.

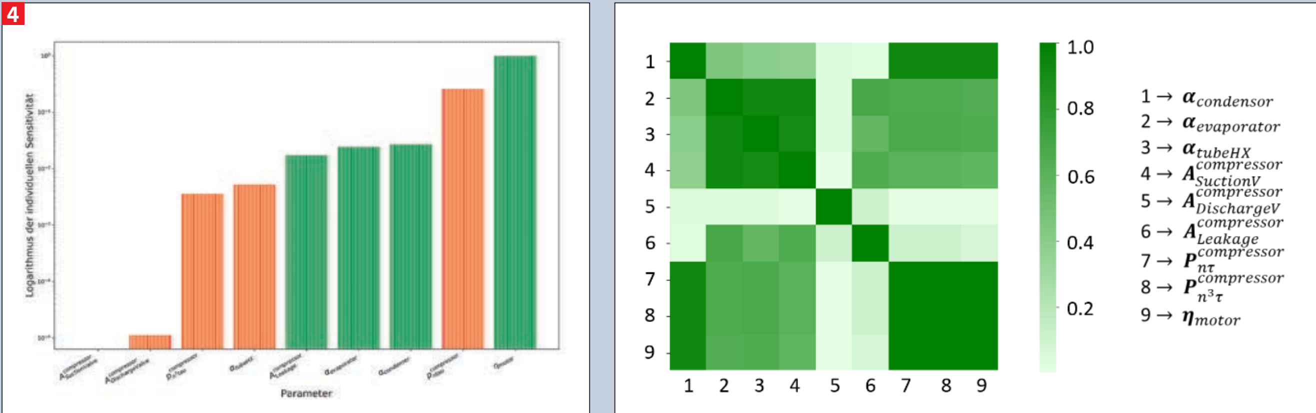
Eine besondere Herausforderung stellt der Abgleich des Modells mit den Messwerten dar. Die Qualität des Abgleichs und die Modellgüte sind kritisch, da auf Basis des Modells über den gesamten Prüfprozess verlässliche Vorschläge erzeugt werden sollen.

3 Ergebnisse

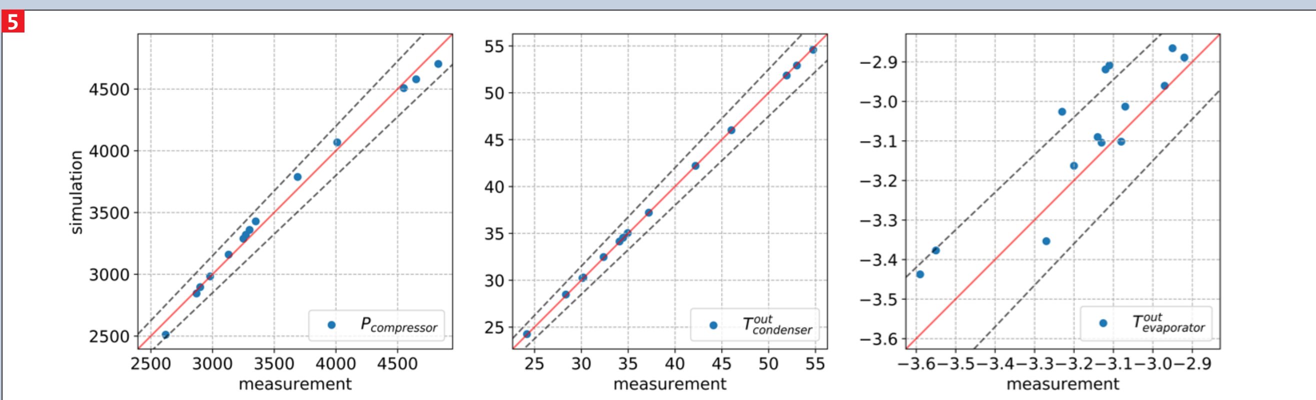
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Voruntersuchung und Modellanalyse anhand historischer WP-Prüfdaten und der reale Einsatz des Assistenzsystems vorgestellt.

3.1 Modellanalyse

Für die Modellanalyse wurde das WP-Modell mit historischen Daten einer kompletten WP-Leistungsprüfung, bestehend aus 14 Prüfpunkten, gefitted. Die Werte der neun Parameter (siehe Abb. 2) wurden durch Lösung des Minimierungsproblems (Gleichung 6 und 7) geschätzt. Dabei wurde die Implementierung des Levenberg-Marquardt-Algorithmus des Python-Paketes scipy genutzt. Die Ergebnisse der Identifizier-



(links:) Reihung nach Parameter-Sensitivität. Die als identifizierbar selektierten Parameter sind grün markiert; (rechts:) Korrelationsmatrix der Parametersensitivität



Simulations- gegenüber Messwerten für (a) Kompressorleistung, (b) Kondensatoraustrittstemperatur, (c) Verdampferaustrittstemperatur. Die strichlierte Linie entspricht einem ±5 % Fehlerbereich.

barkeitsanalyse am Optimum sind in Abb. 4 (links) dargestellt. Die Abbildung zeigt die Sensitivitäten der einzelnen Parameter. Vier von neun Parametern sind identifizierbar, diese sind grün markiert. Weiterhin ist zu erkennen, dass, obwohl eine hohe Sensitivität des Modells für Parameteränderungen vorliegt, der Parameter $P^{compressor}_{ntau}$ nicht in die identifizierbare Teilmenge aufgenommen wurde. Das kann mit Korrelationen mit anderen identifizierbaren und sensitiveren Parametern, bspw. η_{motor}, erklärt werden. Dieses Ergebnis wird durch die Korrelationsmatrix in Abb. 4 (rechts) bestätigt.

Die vier selektierten Parameter wurden für die adaptive Modellanpassung genutzt. Für alle weiteren Parameter wurden Herstellerangaben bzw. Literaturwerte genutzt. Die Ergebnisse des Fittings sind in Abb. 5 dargestellt. Sie zeigen eine brauchbare Modellgenauigkeit mit nahezu allen relativen Fehlern in einem ±5 % Bereich.

3.2 Adaptive Modellkalibrierung (Virtuelle Realisierung)

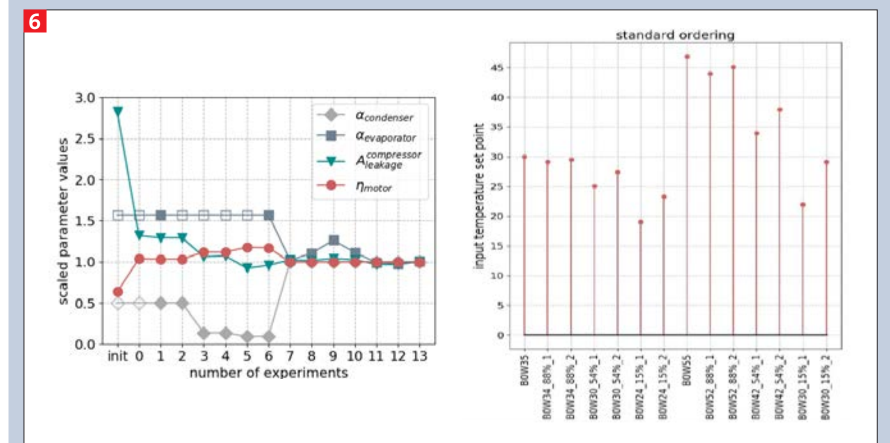
Die adaptive Modellkalibrierung basiert auf einer schrittweisen wiederholten (Neu-)Anpassung der identifizierbaren Modellparameter. Die Entwicklung der Parameter-Schätzwerte hängt dabei von der Reihenfolge der Prüfpunkte ab, diese ist für eine Standardreihenfolge in Abb. 6 dargestellt. Die Parameterwerte sind mit ihren bestmöglichen Abschätzungen skaliert. Bei einer robusten schrittweisen Abschätzung konvergieren die Parameter zu eins. In Abb. 6 ist das der Fall, wenn der siebte Prüfpunkt hinzugefügt wird. Dieser markiert den Wechsel von der Nieder- auf die Mitteltemperaturanwendung.

Um die Konvergenz der schrittweisen adaptiven Parameter-Schätzung zu verbessern, wurde eine alternative Prüfpunktreihenfolge verwendet, siehe Abb. 7. In diesem Fall werden die Referenzpunkte (Volllastpunkte) nach EN-14511 für Nieder- und Mitteltemperaturanwendung zuerst realisiert. In Abb. 7 kann beobachtet werden, dass dann die Parameter bereits nach dem dritten Prüfpunkt sehr nahe an dem finalen besten Schätzwert sind. Die Modellgenauigkeit verbessert sich schneller im Vergleich mit der Standardreihung und somit auch die Genauigkeit der Vorhersagen des Assistenzsystems. Als zusätzlicher Nebeneffekt sollen die Temperaturvariationen zwischen den Prüfpunkten minimiert werden. Dies bedeutet beschleunigte Übergangsphasen zwischen den Prüfpunkten und geringere Lastwechsel und damit einen reduzierten Energieeinsatz.

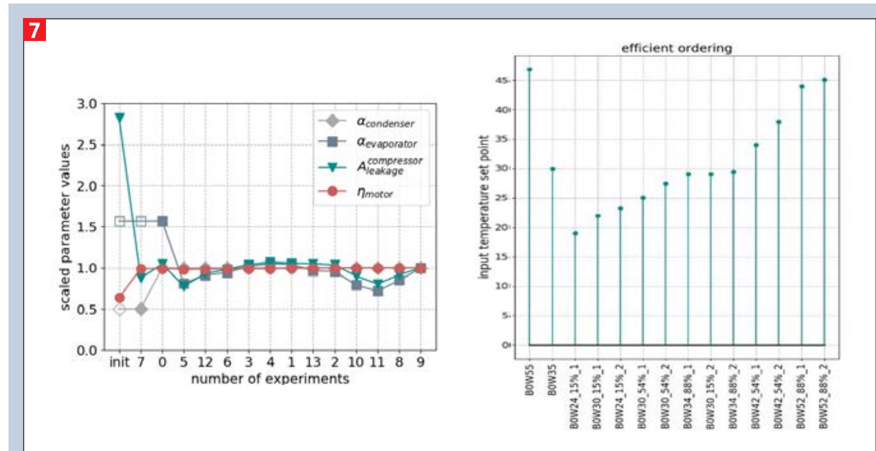
3.3 Einsatz des Assistenzsystems

Wie in Abschnitt „Virtuelle Metrologie“ beschrieben, generiert das Assistenzsystem Vorschlagswerte für Kondensatormassenstrom und Kondensatoreintrittstemperatur für den Anlagenfahrer. Sie dienen dazu, die in der Prüfvorschrift vorgegebene Mischtemperatur, siehe Gleichung 1, bei einem Ein-/Ausbetrieb

zu erreichen. Das Simulationsmodell ermittelt die beiden Kondensatortemperaturen bzw. deren Differenz sowie die Heizleistung. Mit Einsatz des Assistenzsystems wurde die WP-Leistungsprüfung mit 7 (2 Referenzpunkte + 5 Teillastpunkte) durchgeführt. Basierend auf Daten der beiden Referenzpunkte (B0W35 und B0W55), in denen keine Teillastemulation notwendig ist, wurde das Modell das erste Mal kalibriert. Dieser Vorgang wurde anschließend mit jedem abgeschlossenen Prüfpunkt für die jeweils verbleibenden Prüfpunkte wiederholt. Mithilfe des Assistenzsystems und damit der Vorhersage von Temperaturen und Massenstrom konnte vollständig verhindert werden, dass eine iterative Anpassung für die emulierte Kondensator-Durchschnittstemperatur notwendig ist. Der experimentelle Aufwand wurde halbiert. Tab. 4 zeigt die vorgeschlagenen und tatsächlich realisierten Massenströme der einzelnen Prüfpunkte und Tab. 5 die Abweichung zur definierten Durchschnittstemperatur $T_{\text{aus}}^{c,\text{norm}}$. Es zeigt sich, dass die Realisierung in jedem getesteten Prüfpunkt innerhalb der erlaubten Abweichung von 0,2 K liegt.



(links:) Parameterentwicklung für die adaptive Modellkalibrierung für die Standardreihung von Prüfpunkten; (rechts:) dazugehörige Verteilung der Kondensator-Eintrittstemperaturen



(links:) Parameterentwicklung der adaptiven Modellkalibrierung für optimierte Reihung von Prüfpunkten; (rechts:) dazugehörige Verteilung der Kondensator-Eintrittstemperaturen

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es konnte ein digitaler Zwilling einer Wärmepumpe demonstriert werden, der sich mit jedem erreichten Stationärpunkt iterativ neu kalibriert und für die gezeigte Anwendung zuverlässig genaue Vorhersagen für Temperaturen, Massenströme und Heizleistungen liefert.

Im Versuch konnte durch das Assistenzsystem unter Zuhilfenahme eines digitalen Zwillings die Anzahl der zu realisierenden Teilasttestpunkte halbiert werden. Gleichzeitig konnten durch die optimale Reihung der Prüfpunkte thermische Lastwechsel der Prüfinfrastruktur minimiert werden, die das Heizen und Kühlen der gesamten Anlage zur Folge haben und maßgeblich die Dynamik und den Energieeinsatz beeinflussen. Damit werden Prüfpunkte schneller erreicht. Insgesamt wurde die Energieeinsparung zu einem Vergleichsversuch mit 47 % abgeschätzt. Zusätzlich zur Anwendung des digitalen Zwillings während des Prüfbetriebs liegt als Endergebnis ein über den Testbereich kalibriertes Modell der Wärmepumpe vor. Es muss darauf hingewiesen werden, dass das Modell für die im Versuch verwendete Wärmepumpe Spezifika enthält. Eine Evaluierung beziehungsweise Modell-Anpassungen an unterschiedliche Wärmpumpenbauarten sowie die Eignung dieses Modells für allgemeine Simulationsanwendungen sollen in zukünftigen Arbeiten untersucht werden. Zudem soll untersucht werden, wie durch zusätzliche Messungen Einzelkomponenten im Kältekreis identifiziert werden können. ■

5 Nomenklatur

Formelzeichen

$\dot{m}$	Massenstrom (kg/s)
P	Elektrische Antriebsleistung (W)
$\dot{Q}$	Wärmestrom (W)
T	Temperatur (K)
n	Drehzahl (%)

Indizes

c	Kondensator
o	Verdampfer
V	Verdichter
norm	Gemäß Norm
gem	Messgröße
avg	Durchschnittsgröße
rec	Vorschlagsgröße
ref	Referenzgröße

LITERATUR

[1] Müller, J. M., Buliga, O. u. Voigt, K.-I.: Fortune favors the prepared: How SMEs approach business mo-del innovations in Industry 4.0. Technological Forecasting and Social Change 132 (2018), S. 2–17

[2] Virtual Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication, Grieves, M. White-Paper. 2018

4 Vorgeschlagene und umgesetzte Temperaturen und Massenströme für jeden Prüfpunkt

	B0W24-15%	B0W30-54%	B0W30-15%	B0W34-88%	B0W42-54%
$\dot{m}^c_{rec}$ (kg/s)	0.663	0.663	0.413	0.655	0.405
$\dot{m}^c_{gem}$ (kg/s)	0.679	0.664	0.400	0.633	0.395
$T^c_{ein,rec}$ (°C)	23.37	27.28	29.06	29.59	37.94
$T^c_{ein,gem}$ (°C)	23.27	27.32	28.85	29.61	37.80

5 Differenzen zwischen gemessener und definierter Durchschnittstemperatur

	B0W24-15%	B0W30-54%	B0W30-15%	B0W34-88%	B0W42-54%
ΔT^c_{avg} (K)	-0.11K	0.05K	-0.20K	-0.05K	-0.14K

[3] Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap. Technology Area 11, Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J. u. Wang, L.
[4] Glaessgen, E. u. Stargel, D.: The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. Structures, Structural Dynamics, and Materials Conferences. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2012
[5] Schüller, A., Modersohn, A., Kawohl, M. u. Wrede, J.: Der Digitale Zwilling in der Prozessindustrie. Informationsmanagement als Grundlage der Digitalisierung. atp magazin, 61(1-2), 70-81.
[6] Boss, B., Malakuti, S., Lin, S.-W., Usländer, T., Clauer, E., Hoffmeister, M. u. Stojanovic, L.: Digital Twin and Asset Administration Shell Concepts and Application in the Industrial Internet and Industrie 4.0. An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper.
[7] Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J. u. Hicks, B.: Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 29 (2020), S. 36–52
[8] López C., D. C., Barz, T., Körkel, S. u. Wozny, G.: Nonlinear ill-posed problem analysis in model-based parameter estimation and experimental design. Computers & Chemical Engineering 77 (2015), S. 24–42

Das Web-Portal der KI

KI Kälte · Luft · Klimatechnik
INGENIEURWISSEN IN FORSCHUNG UND PRAXIS
Abo | RSS | Über uns | Mediaberei
Aktuelle Ausgabe Oktober 2019
NEWS FACHARTIKEL PRODUKTE NORMEN FIRMEN STELLENMARKT TERMINE ARCHIV
THE WHOLE RANGE OF COOLING. FROM ONE SINGLE SOURCE. STULZ
VERDICHTER
GEA prüft möglichen Verkauf von Kompressorenhersteller GEA Bock
Der Düsseldorfer Maschinenbaukonzern GEA prüft im Rahmen der weiteren Fokussierung des Konzerns auf die strategischen Kernmärkte Nahrungsmittel-, Chemie- und Pharmaindustrie einen möglichen Verkauf von GEA Bock. mehr...
15. Oktober 2019 - News
WISSENSCHAFT/KÜHLKONZEPT FÜR ZERSPANUNG
Verdampfungsgekühltes Drehwerkzeug mit einstellbarer Zerspantemperatur
Die Miniaturisierung fertigungstechnischer Prozesse bei konstantem oder gestiegenem Energieumsatz führt zu einer steigenden Wärmestromdichte, was vor allem bei Zerspanungsprozessen zu erhöhtem Verschleiß führt.
Bei der MAS GmbH wird an neuartigen Kühlkonzepten für die Zerspanung geforscht. Hierzu wurde ein Spot-Verdampfer in den Halter eines mit einer cBN-Schneide (cBN = kubisches Bohrnitrid) besetzten Drehwerkzeuges eingebracht. Spot-Verdampfer sind kleine Hochleistungsverdampfer zur Kühlung von Wärmestromdichten bis 107 W·m-2.
Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz von energetisch kontrollierten Werkzeugen bei der Zerspanung von Inconel 718 und gehärtetem 100Cr6. Es kann gezeigt werden, dass durch den Einsatz energetisch kontrollierter Werkzeuge die Temperatur an der Schneide konstant
MEISTGELESENE ARTIKEL
„Go" drücken und Temperatur, Feuchte oder Druck überwachen: Datenlogger
Industriekälte-Lösung in einem Logistik-Frischelager: U-Rohr als Verdampfer-Abscheider-Einheit
Energie- und Risikoberatung: Optimierungspotenziale von Bestands-Kälteanlagen
Die MSS-Theorie: Wie Verdampfer und Expansionsventil zusammenwirken
Kosten senken: Kühle Theke – niedrige Kosten
TERMINE
07. November 2019 Coolektiv Convent Essen
13.-14. November 2019 BVF-Symposium Würzburg
Deutsche Kälte- und

Täglich aktuelle News und Infos!



www.ki-portal.de